

Dr inż. Zbigniew Buško, dr inż. Janusz Frączek,
prof. dr inż. Adam Morecki, Marek Kęciek
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej
Politechnika Warszawska

METODY I ŚRODKI KALIBRACJI ROBOTÓW PRZEMYSŁOWYCH

Streszczenie: W pracy omówiono cel i metody kalibracji robotów przemysłowych. Przedstawiono procedury kalibracji i techniki pomiarowe z zastosowaniem teodolitów elektronicznych sprzężonych z komputerem, oraz interferometrów laserowych opracowane w zespole autorów. Podano obszerny przykład kalibracji robota o strukturze szeregowo-równoległej RNT skonstruowanego w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej. Położenie i orientacja robota określane są, w przypadku pomiarów z teodolitów, w układzie globalnym. Parametry modeli kinematycznych dobiera się na podstawie wyników optymalizacji odpowiednio dobranych funkcjonalów.

METHODS AND MEANS OF INDUSTRIAL ROBOTS CALIBRATION

Abstract: The methods of kinematic calibration of robots with general serial-parallel structure have been presented. The method applied was that technique of measurement using electronic theodolite and laser interferometer.

1. CEL KALIBRACJI. STOSOWANE TECHNIKI POMIAROWE.

W rozumieniu większości autorów kalibracja robota jest, procedurą pomiarową i obliczeniową, która ma na celu ustalenie lub korekcję zależności pomiędzy współrzędnymi wewnętrznymi robota (kątaami w przegubach) oraz współrzędnymi zewnętrznymi (położenia i orientacji chwytaka w układzie globalnym). Ustalenie tej zależności może dotyczyć tylko fragmentu przestrzeni roboczej, albo wszystkich położzeń robota.

W robotach starszych typów, pracujących głównie w trybie odtwarzania nauczonych pozycji lub trajektorii, decydującym wskaźnikiem określającym przydatność robota jest powtarzalność pozycjonowania. W robotach nowoczesnych stawia się dodatkowo wymaganie, aby robot programowany off-line osiągał dużą dokładność w odtwarzaniu zadanej pozycji i orientacji. W takim przypadku znaczny wpływ na dokładność pozycjonowania robota ma dokładność modelu kinematyki robota i w tym, dostatecznie dokładny dobór parametrów modelu.

Ustalony przez producenta model kinematyki robota, obarczony jest zwykle błędami wykonania części mechanicznej robota, błędami wynikłymi z pominięcia efektów podatności i luzów w przegubach, oraz rozbieżnościami wynikłymi z uproszczenia struktury robota poprzez przyjęcie dodatkowych założeń (np. prostopadłość osi). Korekta tych błędów na etapie produkcji seryjnej jest zbyt kosztowna i prowadzi najczęściej do konieczności kalibracji wybranych egzemplarzy robota.

Do klasy zagadnień kalibracji robota zalicza się głównie następujące zagadnienia [1]:

1. Zagadnienie poprawy parametrów geometrycznych modelu kinematyki robota (*kalibracja geometryczna*). Wykorzystuje się tu rozwiązania zadania kinematyki prostej i odwrotnej robota. Kalibracja w tym ujęciu sprowadza się do estymacji parametrów geometrycznych modelu kinematyki robota.
2. Zagadnienie uwzględniania w modelu wpływu podatności i luzów.
3. Zagadnienie powtarzalności i dokładności pozycjonowania robota.
4. Zagadnienie wyznaczenia położenia i orientacji układu współrzędnych globalnych (związanych z podstawą robota). Zadanie to ma podstawowe znaczenie przy współpracy układów robotów.
5. Zagadnienie wyznaczenia współrzędnych zewnętrznych robota w podobszarze przestrzeni roboczej robota.

Metody pomiaru położenia wybranych punktów chwytaka oraz jego orientacji, stosowane dotąd, można podzielić na kilka grup:

1. Metoda kontaktowa, która polega na wykryciu styku określonych punktów chwytaka robota ze specjalnie przygotowanym stanowiskiem o dokładnie znanych położeniach punktów odniesienia na stanowisku pomierzonych wcześniej np. na maszynie współrzędnościowej.
2. Metoda, która polega na pomiarze położenia punktów chwytaka w przestrzeni 3 wymiarowej przy pomocy czujników ultradźwiękowych.
3. Metoda wykorzystująca teodolity do precyzyjnego określenia położenia punktów robota w przestrzeni 3D.
4. Metoda wykorzystująca kamery video albo CCD do pomiaru położenia punktów oznaczonych na robocie np. diodami LED. Zwykle na robocie mocuje się układ diod LED na specjalnie przygotowanym chwycie.
5. Metoda, która wykorzystuje interferometry laserowe.
6. Z zastosowaniem innych przyrządów specjalnie konstruowanych.

W zespole autorów od dłuższego czasu trwają prace nad algorytmami kalibracji robotów o dowolnej strukturze z wykorzystaniem teodolitów elektronicznych oraz ostatnio, prace nad wykorzystaniem do kalibracji interferometrów laserowych [8,9].

Praca przedstawia algorytmy kalibracji prototypu robota szeregowo-równoległego RNT z wykorzystaniem układu 2 teodolitów, oraz koncepcję kalibracji robota z wykorzystaniem interferometru laserowego ROBOTEST (program jest w trakcie realizacji). Przedstawione metody pomiarowe są ogólne i mogą być wykorzystane do kalibracji robotów o dowolnej strukturze.

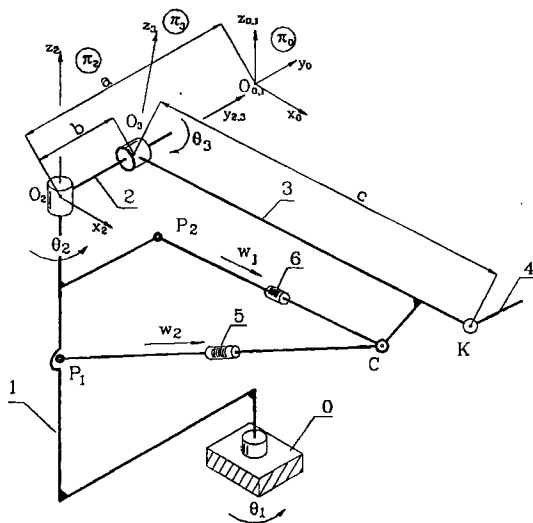
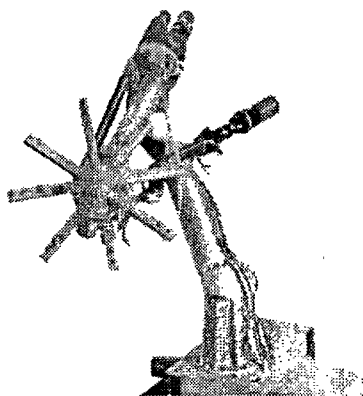
2. KALIBRACJA PROTOTYPU ROBOTA SZEREGOWO-RÓWNOLEGŁEGO RNT Z ZASTOSOWANIEM TEODOLITÓW.

2.1. Układ pomiarowy. Parametry i współrzędne modelu kinematycznego

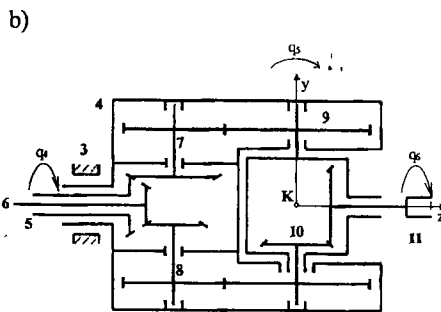
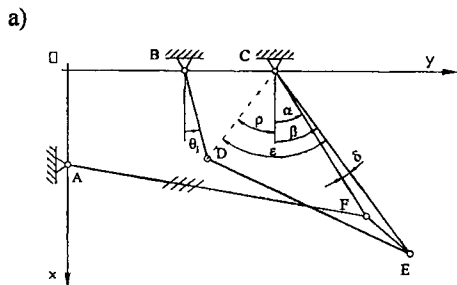
Koncepcję układu pomiarowego, szacowanie niepewności oraz zastosowanie do kalibracji układu współpracujących robotów przedstawiono w pracy [2]. Do kalibracji robota RNT zastosowano ten sam układ pomiarowy.

Na rys. 2.1, 2.2 i 2.3 przedstawiono kolejno widok robota RNT [3], schemat kinematyczny mechanizmu jego górnej części, oraz schemat kinematyczny mechanizmu napędu podstawy oraz kiści sferycznej (rysunek 2.3b zaczerpnięto z pracy [4]). Układ sterowania robota RNT

wykorzystuje model kinematyczny do realizacji procedur rozwiązujących proste i odwrotne zadanie kinematyki na położenie.



Rys.2.1. Robot szeregowo-równoległy RNT Rys.2.2 Schemat kinematyczny robota.



Rys.2.3. Schemat kinematycznych napędu kolumny manipulatora (a) i kiści sferycznej (b).

Procedury określają związki między współrzędnymi Q ostatniego członu manipulatora (współrzędne zewnętrzne) oraz współrzędnymi

$$f = [f_1, f_2, \dots, f_6]^T \quad (2.1)$$

definiowanymi jako liczby pełnych obrotów wirników silników napędowych. W opracowaniu [4] przyjęto współrzędne zewnętrzne w postaci macierzy rotacji R układu kartezjańskiego π_6 związanego z ostatnim członem manipulatora (element kiści przeznaczony do mocowania efektora) względem układu π_0 związanego z nieruchomą podstawą. Trójkę współrzędnych zewnętrznych tworzą współrzędne k (w układzie π_0) punktu K usytuowanego na wysięgniku

ramienia, będącego środkiem złożonej pary sferycznej zbudowanej w postaci tzw. kiści manipulatora zrealizowanej jako zębaty mechanizm różnicowy. W niniejszym opracowaniu, dla skrócenia zapisu, przyjmuje się opis rotacji R w postaci wektora e (rzeczywisty wektor własny macierzy R) oraz kąta χ obrotu Eulera. Ostatecznie współrzędne zewnętrzne są zapisywane w postaci macierzy kolumnowej:

$$Q = [k^T, e^T, \chi]^T. \quad (2.2)$$

Definiuje się więc zatem 7 współrzędnych zewnętrznych, z których trzy są związane równaniem $e^T e = 1$.

Kalibracja polega na:

- korekcji parametrów wykorzystanych do opisu modelu kinematycznego,
- weryfikacji założeń dotyczących struktury oraz więzi kinematycznych przyjętych w modelu.

Model posiada 29 parametrów uporządkowanych w postaci wektora p :

$$p = [a, b, c_x, c_y, d, e, f, g, h, i, j, \delta, q_1^0, w_x, w_y, w_z, k_x, k_y, k_z, h_{xx}, h_{xy}, h_{xz}, h_{yx}, h_{yy}, h_{yz}, h_{zx}, h_{zy}, h_{zz}, v]$$

Znaczenie parametrów modelu jest opisane jest w [4], a ich wstępne wartości określono na podstawie rysunków technicznych.

Żaden z parametrów składowych wektora p nie może być mierzony bezpośrednio na zmontowanym robocie. Wynika to z ich definicji i z przyjętej techniki pomiarowej. Niektóre parametry są przyjęte w sposób umowny, na przykład, skok śruby przyjęto jako stały i jednokowy dla wszystkich napędów. Innym umownymi parametrami są punkty O_0, O_1, O_2 przecięcia osi ruchu (rys.2.2).

Wśród parametrów p można wyróżnić parametry będące wielkościami geometrycznymi, opisującymi model mechanizm manipulatora i mechanizmy napędu. Niektóre z nich można wyznaczyć metodą pomiarów pośrednich. Pozostałe parametry geometryczne są niedostępne do pomiarów (np. długości członów mechanizmu z rys. 2.2). Występują też parametry w postaci liczb, nie posiadające prostej interpretacji geometrycznej. Są to na przykład parametry przeliczników napędów.

Oprócz współrzędnych f oraz Q przyjmuje się współrzędne katowe wewnętrzne q :

$$q = [q_1, q_2, \dots, q_6]. \quad (2.3)$$

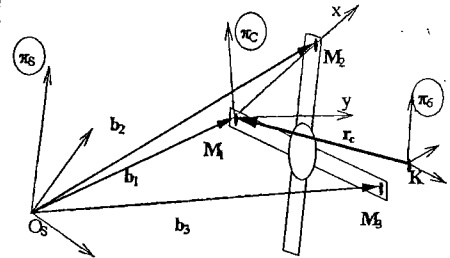
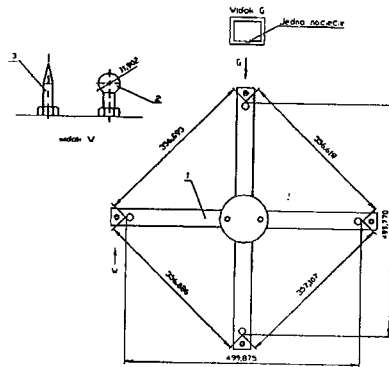
Pierwsze trzy, w postaci kątów obrotu członów manipulatora pokazano na rysunku 2.2.

Kąty obrotu członów - współrzędne q_4, q_5, q_6 , pokazano na rysunku 2.3b. Są to kąty q_4 -obrotu członu (4) względem (3), q_5 - obrotu członu (9) względem (4) oraz q_6 - obrotu członu (11) względem (9). Wyróżnienie współrzędnych q jest potrzebne do opisu ruchu wysięgnika (człon 3, rys. 2.2) ramienia manipulatora i określania tzw. przeliczników opisujących związki między kątami q_4, q_5, q_6 i współrzędnymi sterującymi f_4, f_5, f_6 .

2.2 Metody kalibracji robota RNT.

Metody kalibracji są ściśle związane z techniką i możliwościami pomiarowymi. Do określania współrzędnych zewnętrznych Q manipulatora przyjęto technikę, polegającą na pomiarze współrzędnych kartezjańskich trzech (z czterech) markerów umieszczonych na głowicy pomiarowej (rys.2.4), związanej sztywno z ostatnim członem manipulatora. Z pomiaru kątów obserwacji markerów (z dwóch teodolitów), po obliczeniach, otrzymuje się współrzędne

wektorów wodzących punktów M_1, M_2, M_3 (rys.2.5) w układzie bazowym π_S odpowiednio jako $\mathbf{b}_1^{(S)}, \mathbf{b}_2^{(S)}, \mathbf{b}_3^{(S)}$. Na punktach celowniczych markerów rozpina się układ współrzędnych π_C o początku umiejscowionym na markerze M_1 (rys.2.5).



Rys. 2.4 Głowica pomiarowa CUPAK I Rys.2.5. Dobór układów współrzędnych.

Układ π_C przyjęto arbitralnie tak, że jego oś x przebiega z punktu M_1 przez M_2 a oś y ma kierunek iloczynu $(\tilde{\mathbf{b}}_2 - \tilde{\mathbf{b}}_1) \times (\tilde{\mathbf{b}}_3 - \tilde{\mathbf{b}}_1)$. Z bazą związany jest układ π_S utworzony analogicznie. Po obliczeniu współrzędnych wektorów f, g, h :

$$\begin{aligned} \mathbf{f} &= \frac{\mathbf{b}_2^{(S)} - \mathbf{b}_1^{(S)}}{\|\mathbf{b}_2^{(S)} - \mathbf{b}_1^{(S)}\|}, \\ \mathbf{g} &= \frac{(\tilde{\mathbf{b}}_3^{(S)} - \tilde{\mathbf{b}}_1^{(S)}) (\mathbf{b}_3^{(S)} - \mathbf{b}_1^{(S)})}{\|(\tilde{\mathbf{b}}_3^{(S)} - \tilde{\mathbf{b}}_1^{(S)}) (\mathbf{b}_3^{(S)} - \mathbf{b}_1^{(S)})\|}, \\ \mathbf{h} &= \tilde{\mathbf{f}} \mathbf{g}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

otrzymuje się macierz transformacji z układu π_C do π_T w postaci:

$$\mathbf{R}_C = [\mathbf{f} \ \mathbf{g} \ \mathbf{h}]. \quad (2.5)$$

Macierz tę można sprowadzić do rotacji względem układu związanego z teodolitem π_T .

Po wyznaczeniu stałej macierzy $\mathbf{R}_{6,C}$ orientacji układu π_C względem układu π_6 związanego z ostatnim członem manipulatora, stałego w π_6 wektora \mathbf{r}_C , oraz rotacji układu π_0 związanego z podstawą manipulatora, można określić macierz orientacji ostatniego członu robota \mathbf{R} , której wektor własny \mathbf{e} oraz kąt obrotu Eulera χ są takie, jak we wzorze (2.2).

Zależność między współrzędnymi \mathbf{e} , χ i macierzą \mathbf{R} wyraża się związkami:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \cos \chi \mathbf{E} + (1 - \cos \chi) \mathbf{e} \mathbf{e}^T + \sin \chi \tilde{\mathbf{e}}, \\ \cos \chi &= \frac{1}{2} (\text{tr}(\mathbf{R}) - 1). \end{aligned} \quad (2.6)$$

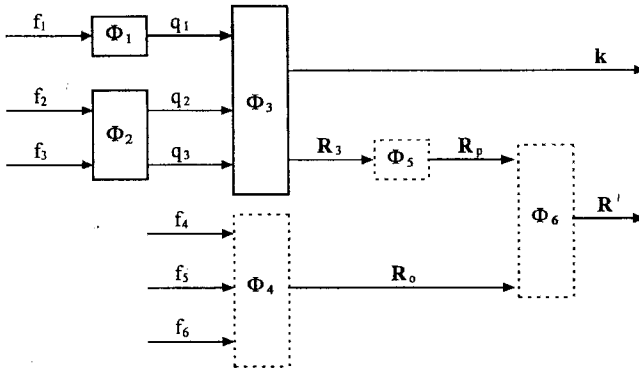
Od chwili określenia orientacji $\mathbf{R}_{6,C}$, oraz \mathbf{r}_C , pomiar współrzędnych trzech markerów głowicy pomiarowej jest równoważny pomiarowi współrzędnych zewnętrznych \mathbf{Q} . Załóżmy, że

macierz $R_{6,C}$, oraz r_c , zostały wyznaczone; sposób obliczania tych wielkości zostanie przedstawiony niżej w punkcie 2.3.

Kalibrację parametrów wykorzystanych do opisu modelu kinematycznego, można prowadzić dalej metodami optymalizacji komputerowej, wykorzystując procedurę rozwiązywania zadania prostego na położenie oraz jacobian manipulatora zdefiniowany jako:

$$J = \left[\frac{\partial Q}{\partial f} \right] \quad (2.7)$$

Metoda taka wymaga dużej liczby pomiarów, co przy półautomatycznym wprowadzaniu danych pozyskiwanych z pomiarów teodolitami wymaga wielodniowych sesji pomiarowych. Ponadto, nie uzyskuje się w tym przypadku informacji o deformacji modelu (prostokątność osi, przecinanie się ich w określonych punktach itp.) niezbędnych do realizacji drugiego celu kalibracji - korekty struktury modelu. Dlatego, dla celów kalibracji zdekomponowano model kinematyczny $Q = \Phi(f, p)$ robota na modele cząstkowe Φ_i (rys. 2.6):



Rys. 2.6. Dekompozycja modelu kinematycznego RNT

W ogólnym przypadku, symbole Φ_i oznaczają tu związki funkcyjne między współrzędnymi, realizowane za pomocą fragmentów procedur kinematycznych napisanych dla celów obliczeń kalibracyjnych w środowisku MATLAB-a [5].

Bloki pokazane na rysunku 2.6 linią przerywaną przedstawiają transformacje między współrzędnymi występujące w części szeregowej mechanizmu, w której osie ruchu kolejnych członów mają ustalone względem nich kierunki, a także transformacje stałe - niezależne od współrzędnych (Φ_5 i Φ_6). Parametry modeli Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 , przedstawionych linią ciągłą mogą być obliczane metodami optymalizacji przez minimalizację:

$$Z_j = \min_{p_i, N} M_j \quad (2.8)$$

funkcjonałów M_j , zbudowanych na współrzędnych uzyskiwanych z pomiarów i obliczeń prowadzonych według procedur, zastosowanych w układzie sterowania robota. Przykładem może być funkcjonal postaci

$$M_3 = \sum_i (\tilde{k}_i - k_i)^T (\tilde{k}_i - k_i) \quad (2.9)$$

zbudowany na wektorze punktu K środka kiści sferycznej. W (2.9) symbolem \tilde{k} oznaczono wielkość mierzoną wektora, a sumowanie przebiega po numerach położeń manipulatora różniących się współrzędnymi q_1 , q_2 , i q_3 . Optymalizowanymi parametrami modelu są tu wielkości a , b , c_x , c_y , w_x , w_y [4].

Trzeba podkreślić, że warunkiem efektywnego przeprowadzenia optymalizacji jest powtarzalność pozycjonowania uzyskiwana podczas wielokrotnych pomiarów.

2.3. Identyfikacja parametrów modelu – wybrane wyniki kalibracji.

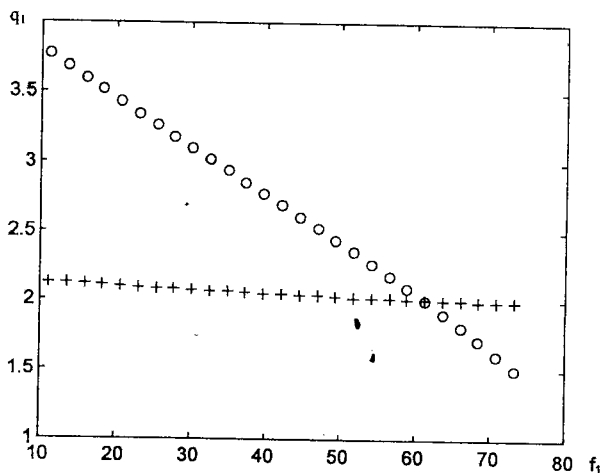
Poniżej przedstawiono dwa przykłady wyników kalibracji prototypu robota. Wyniki te posłużyły do precyzyjnej kalibracji robota. Kalibracja ostateczna jest prowadzona w oparciu o wyniki pomiarów interferometrem laserowym.

Identyfikacja osi z układu π_0

W celu określenia położenia osi z_0 względem układu bazowego π_0 , dokonano pomiarów współrzędnych kątowych 1 markera głowicy pomiarowej umieszczonej na ostatnim członie manipulatora w kilkudziesięciu położeniach ramienia, różniących się wartością zmiennej sterującej f_1 (silnik 1) i dla ustalonych pozostałych zmiennych. Pomiar położenia jednego punktu jest wystarczający w związku z jego płaskim ruchem względem ustalonej osi. Obliczono współrzędne punktów, a następnie zrzutowano je na płaszczyznę, położoną względem nich najbliżej w sensie minimum sumy kwadratów odległości. Wersor kierunkowy płaszczyzny przybliży najlepiej (w sensie minimum sumy kwadratów) oś obrotu manipulatora w pierwszej parze (rys.2.2).

Identyfikacja modelu Φ_1

Zadanie dotyczy zależności funkcyjnej $q_1 = \Phi_1(f_1, p_1)$ czyli identyfikacji modelu Φ_1 przedstawionego na rys. 2.6. Z pomiarów opisanych w poprzednim punkcie otrzymano zależność między kątem obrotu q_1 i zmienną sterującą f_1 . Przebieg tego kąta dla identycznych wartości wektora zmiennej sterującej f , obliczono również za pomocą programu symulującego kinematykę robota zaprogramowaną w układzie sterującym.



Rys.2.7. Przebieg współrzędnej q_1 w zależności od f_1

Na rys. 2.7 pokazano wyniki otrzymane z badań wstępnych prototypu robota. Punkty oznaczone symbolem „o” są punktami pomiarowymi. Krzyżykiem oznaczono wielkości otrzymane z modelu [4]. Można zauważyć całkowitą rozbieżność wyników. Rozbieżność

można tłumaczyć błędami synchronizacji i źle przyjętymi parametrami modelu napędu (rys.2.2) w badaniach wstępnych prototypu robota.

Identyfikacja osi z_2 układu π_2

Eksperyment polega na pomiarze współrzędnych trzech markerów głowicy pomiarowej, dla ustalonego wektora sterowań f z wyjątkiem jego współrzędnej f_3 (silnik 3), której wartości przebiegają cały zakres wartości dopuszczalnych.

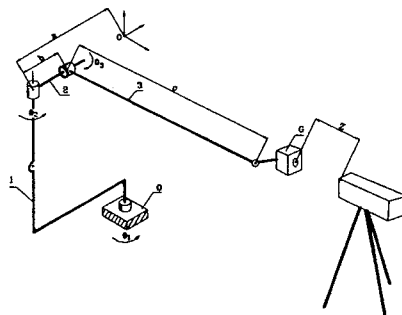
Taki sposób pomiaru wynika z faktu, że dla modelu (rys.2.2) ruch głowicy powinien być ruchem obrotowym względem osi z_2 układu π_2 . Sposób przeprowadzenia eksperymentu pozwala zarówno na potwierdzenie tego założenia jak i wyznaczenie zależności między kątem q_2 i zmienną f_3 (tzn. pozwala na identyfikację części modelu Φ_2).

Z pomiarów kalibracyjnych obliczono wektor $e_{z_2}^{(S)}$ osi z_2 w układzie bazowym oraz jego kąt względem osi π_0 .

Przebieg kąta wektora względem osi z_0 π_0 dla każdego pomiaru potwierdza słuszność założenia co do ich równoległości. Zmiany tego kąta mieściły się w granicach błędu pomiaru. Z obliczeń otrzymano natomiast wyniki wskazujące na przemieszczenia równoległe osi obrotu większe niż wynika to z dokładności pomiaru. Prawdopodobnie prototyp manipulatora wykonywał ruchy w pozostałych parach kinematycznych.

3. KALIBRACJA PROTOTYPU ROBOTA SZEREGOWO-RÓWNOLEGŁEGO RNT Z ZASTOSOWANIEM INTERFEROMETRU LASEROWEGO.

Zastosowanie teodolitów elektronicznych do kalibracji robotów przemysłowych pozwala na identyfikację parametrów z dokładnością rzędu 0,3 mm. Kalibracja z zastosowaniem teodolitów jest kłopotliwa, ponieważ wymaga długotrwałych pomiarów i precyzyjnych odczytów. Jest ponadto kalibracją statyczną, tzn. nie pozwala na prowadzenie pomiarów na robocie znajdującym się w ruchu (na tzw. kalibrację dynamiczną). Wad tych nie posiada metoda pomiarów interferometrem laserowym. Specjalistyczne urządzenia laserowe są jednak drogie i zwykle wykorzystuje się je do kalibracji tylko w bogatych przedsiębiorstwach [7].



Rys. 3.1. Zasada pomiaru położenia chwytu robota interferometrem laserowym.

Dla prowadzenia badań dotyczących kalibracji z wykorzystaniem interferometrii laserowej wykorzystano system ROBOTEST [6] zainstalowany w PIAP, wykorzystywany dotychczas do

sprawdzania charakterystyk dokładnościowych robotów. System ten charakteryzuje bardzo wysoka dokładność pomiaru wzdłuż osi wiązki laserowej o średnicy 20 mm (rzędu μm) oraz co najmniej o rząd mniejsza dokładność pomiaru w kierunkach prostopadłych. Mniej dokładny jest także pomiar kątów obrotu głowicy pomiarowej.

Wobec powyższego zaprojektowano algorytm kalibracji oparty jedynie na pomiarze przemieszczeń względnych głowicy pomiarowej umieszczonej na robocie wzdłuż osi wiązki laserowej (wielkość z na rys. 3.1). Ruch głowicy w wiązce jest realizowany przez zmiany kątów θ_1 , θ_2 i θ_3 . Pomiary przyrostów współrzędnej z umożliwiają określenie parametrów a , b i c minimalizujących funkcjonal utworzony z równań więzów wynikających z geometrii i struktury łańcucha par kinematycznych 0-1, 1-2 i 2-3. W ten sam sposób możliwa jest kalibracja pełnego modelu kinematyki robota (bez szczegółowej dekompozycji) prowadzona w wielu położeniach robota podczas ruchu po trajektoriach zawartych wewnątrz wiązki laserowej. Do ruchu po takich trajektoriach robot jest specjalnie programowany. W chwili obecnej trwają zaawansowane prace nad kalibracją robota RNT z zastosowaniem systemu ROBOTEST.

PIŚMIENNICTWO

- [1] J.M.Hollerbach: *A Survey of Kinematic Calibration*. The Robotics Review, MIT 1989, ed. O.Khatib, J.J.Craig, T.Lozano-Perez.
- [2] Buśko Z., Frączek J: *Kalibracja układu wielorobotowego z zastosowaniem teodolitów elektronicznych*. Materiały konferencji Automation '97. Mera -PIAP, Warszawa 1997, str. 413-418.
- [3] Mianowski K., Nazarczuk K.: *Badania doświadczalne i ocena własności mechanicznych manipulatora szeregowo-równoległego RNT*, Prace Naukowe ICT Polit. Wrocławskiej, V Kraj. Konf. Robotyki, Wrocław 1996, t. II, str. 347-354,
- [4] Marek Wojtyra: *Zadanie proste i odwrotne kinematyki dla robota RNT*, opracowanie dla programu PATIA, Warszawa 1996
- [5] *MATLAB High-Performance Numeric Computation and Visualization Software*. The Mathworks Inc. 1992. Users and Reference Guide. Optimization Toolbox.
- [6] Robotest – system pomiarowy z wykorzystaniem interferometru laserowego.
- [7] Shirinzadeh B.: *Laser-interferometry-based tracking for dynamic measurements*. Industrial Robot, vol. 25, no 1, 1999.
- [8] J.Fraćzek, Z.Buśko, A. Morecki: *Identification of Robot Kinematic Parameters Using Bases Correction*. Advances in Multibody Systems and Mechatronics, Duisburg, Germany Sept. 25, 1999.
- [9] J.Fraćzek, Z.Buśko: *Calibration of multirobot System without and under load, using electronic theodolites*. Proceed. of the First Workshop on Robot Motion and Control – ROMOCO'99, Tech. Univ. of Zielona Góra, Poznań Univ. of Technology, June 28-29, 1999, Kiekrz, Poland.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego KBN nr 7 T07B 038 17